

ХАЙРУЛЛИН ИЛЫГИЗ РАВИЛЕВИЧ

**РЕГУЛИРУЕМЫЙ АСИНХРОННЫЙ
ВЕНТИЛЬНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С АВТОГЕНЕРАТОРНЫМ
ИНВЕРТОРОМ НАПРЯЖЕНИЯ**

Специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Казань, 2009

Диссертация выполнена в ГОУ ВПО «Казанский
государственный технологический университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Макаров Валерий Геннадьевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Афанасьев Анатолий Юрьевич

кандидат технических наук, доцент
Мухаметгалеев Танир Хамитевич

Ведущее предприятие: ООО «ПУ Казаньэлектроцит», г. Казань.

Защита состоится «29» декабря 2009 г. в 14³⁰ часов на
заседании диссертационного совета Д 212.082.04 при Казанском
государственном энергетическом университете по адресу: 420066,
РТ, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51, ауд. В-202.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенных
печатью учреждения) направлять по адресу: 420066, г. Казань,
ул. Красносельская, д. 51, Ученый Совет КГЭУ. Факс: (843) 5438624,
5184464.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке
ГОУ ВПО «Казанский государственный энергетический
университет».

С авторефератом можно ознакомиться на сайте
ГОУ ВПО КГЭУ – www.kgeu.ru.

Автореферат разослан «26» ноября 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.082.04
кандидат педагогических наук, доцент

Лопухова Т.В. Лопухова

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000621548

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ. Характерной тенденцией современного этапа развития технологий является расширение применения регулируемых электроприводов переменного тока в различных устройствах специальной и бытовой техники. В качестве силовой основы таких электроприводов выступают асинхронные двигатели (АД), а в структуре силовой части имеется звено постоянного тока в совокупности с автономным инвертором. Подобная структура электропривода получила название электромеханотронной системы (ЭМТС).

ЭМТС на базе двигателя переменного тока и самовозбуждающегося магнитно-транзисторного инвертора напряжения (МТИН) получили название автогенераторных. К достоинствам МТИН следует отнести его экономичность в силу потребления реактивного тока, а также совмещение в одном устройстве функции силового инвертора и блока управления частотой. Такие инверторы устойчивы к воздействию магнитных полей и различным механическим нагрузкам.

Автогенераторные схемы управления трехфазных МТИН выполнялись на базе групповых и стержневых трансформаторов, однако наиболее перспективной является совмещенная конструкция, сочетающая в себе асинхронную электрическую машину с размещенными в пазах статора обмотками управления транзисторов инвертора. Такая конструкция получила название асинхронный вентильный двигатель (АВД).

Для систем электропривода малой мощности, особенно для электроприводов бытовой и специальной техники, актуальной является проблема снижения массо-габаритных показателей. Одним из способов решения данной проблемы является создание вентильных машин, имеющих совмещенную конструкцию.

Работа является продолжением исследований в области электромеханотронных систем с автогенераторным управлением, в течение ряда лет проводимых на кафедре электропривода и электротехники Казанского государственного технологического университета.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ – регулируемый асинхронный вентильный двигатель с автогенераторным инвертором напряжения.

ПРЕДМЕТ ИССЛЕДОВАНИЯ – проектирование, математическое моделирование, энергетические показатели асинхронного вентильного двигателя с учетом нелинейности магнитопровода.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ заключается в создании АВД с улучшенными механическими, энергетическими, экономическими, технологическими показателями для работы в регулируемых электроприводах малой и средней мощности.

ЗАДАЧА НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ – разработка схемотехнического решения, математической модели и исследование АВД.

В соответствии с поставленной задачей в работе рассматриваются следующие вопросы:

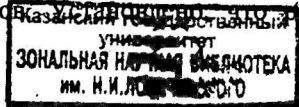
- разработка схемотехнического решения и конструкции АД;
- анализ методов исследования автогенераторных ЭМТС;
- разработка математической модели АД с учетом нелинейности магнитопровода;
- численное исследование процессов электромеханического преобразования энергии в АД;
- проведение экспериментальных исследований.

ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. Комплексное исследование АД включает в себя качественный анализ с помощью аналитических методов, количественный анализ с помощью численных методов расчета на ЭВМ и эксперимент. В основу аналитических исследований положен математический аппарат теории ориентированных графов, математическая теория электрических машин, теория обобщенной электрической машины, теория электрических цепей, методы мгновенных значений, теории обыкновенных дифференциальных уравнений и матричной алгебре. Численные исследования, проведенные на ЭВМ в системе *Turbo Pascal 7.0*, базировались на известных методах вычислительной математики. Экспериментальные исследования проводились с использованием пакета *PowerGraph 3.3 Professional*.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА РАБОТЫ представлена следующими результатами:

- предложено новое схемотехническое решение АД;
- на основании теории ориентированных графов разработана математическая модель трехфазного обобщенного преобразователя электрической энергии, отличительной особенностью которой является введение переключающих функций, характеризующих состояние вентиля, непосредственно в топологические матрицы;
- с применением математического аппарата теории обобщенной машины разработана математическая модель АД с учетом нелинейности магнитопровода, позволяющая исследовать процессы электромеханического преобразования энергии;
- проведено численное исследование процессов электромеханического преобразования энергии в разработанной схеме АД, определены мгновенные, статические и динамические характеристики;
- проведен качественный и количественный анализ электромагнитных и электромеханических процессов в АД;
- проведен сравнительный анализ результатов численного и экспериментального исследования.

ОБОСНОВАННОСТЬ И ДОСТОВЕРНОСТЬ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ подтверждаются возможностью практической реализации предлагаемой схемы АД. В основе математической модели ЭМТС лежит теория ориентированных графов, теория обобщенных функций, математическое описание АД с учетом нелинейности магнитопровода. Компьютерное моделирование и исследование производилось с использованием современных численных методов. Установлено, что результаты моделирования



процессов электромеханического преобразования энергии соответствуют реальным процессам в АД.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ состоит в следующем:

- разработана электрическая принципиальная схема и конструкция АД, предназначенного для работы в регулируемом электроприводе малой и средней мощности;

- разработана методика проектирования АД;

- созданы аналитические математические модели, предназначенные для качественного и количественного анализа процессов преобразования энергии в АД;

- для исследования процессов электромеханического преобразования энергии в АД разработаны численные модели, реализованные в системе программирования *Turbo Pascal 7.0*;

- по результатам теоретических и экспериментальных исследований спроектированы, изготовлены и испытаны макетные образцы АД мощностью 750 Вт, проведен анализ технического уровня.

РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ. Основные результаты диссертационной работы использованы в ОАО «Нижекамскнефтехим» завод «Олигомеров», г. Нижнекамск при проектировании электроприводов запорной арматуры, электроприводов типа мотор-колесо и вентиляторов, а также в МПТ «ЖКХ», г. Нижнекамск при проектировании и эксплуатации систем вентиляции технических боксов.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ:

- принципиальная схема и методика проектирования АД;

- математическая модель АД с учетом нелинейности магнитопровода;

- методика компьютерного исследования математической модели в системе программирования *Turbo Pascal 7.0*;

- статические и динамические характеристики АД;

- результаты экспериментального исследования АД.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на V Международной научно-практической конференции «Информационные технологии и математическое моделирование» (г. Анжиро-Судженск, 2006 г.), на XIX и XXI Всероссийской межвузовской научно-технической конференции «Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» (г. Казань, 2007 г., 2009 г.), на V Международной (XVI Всероссийской) научной конференции (г. С.-Петербург, 2007 г.), на Международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии» (г. Томск, 2007 г.), на Всероссийской молодежной научной конференции «Мавлютовские чтения» (г. Уфа, 2008 г.), на I и II Всероссийской научно-технической конференции «Электротехнологии,

электропривод и электрооборудование предприятий» (г. Уфа, 2007 г., 2009 г.).

ЛИЧНОЕ УЧАСТИЕ АВТОРА заключалось в решении следующих задач:

- анализ возможных направлений совершенствования конструкций АД;
- разработка математической модели АД с учетом нелинейности магнитопровода;
- численная реализация разработанной математической модели;
- разработка принципиальной электрической схемы АД;
- создание методики проектирования АД;
- исследование статических и динамических характеристик АД;
- проведение экспериментальных исследований.

ПУБЛИКАЦИИ. По теме диссертации опубликовано 17 печатных работ, из них 5 опубликованы в издании рекомендованном ВАК, получен патент РФ на изобретение № 2326491 от 10 июня 2008 года.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка из 98 наименований. Общий объем диссертации 171 страница, из них 155 страниц машинописного текста, 2 приложения, 9 таблиц, 72 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ВО ВВЕДЕНИИ обоснована актуальность темы, определена цель, задачи исследования, изложены основные научные результаты, выносимые на защиту, практическая ценность работы, апробация и реализация результатов, определены ее структура, объем и содержание.

В ПЕРВОЙ ГЛАВЕ диссертации «Постановка задачи исследования» проводится анализ состояния, перспектив развития и методов исследования вентильных электрических машин с автогенераторными инверторами напряжения.

В течение ряда лет на кафедре электропривода и электротехники КГТУ ведутся разработки двух- и трехфазных магнитно-транзисторных инверторов напряжения (МТИН). Для трехфазных электрических машин разработаны, испытаны и внедрены МТИН на групповом и трехстержневом трансформаторах. Идеи, заложенные в МТИН на трехстержневом трансформаторе, получили свое дальнейшее развитие в трехфазном асинхронном вентильном двигателе (АВД). Отличительной особенностью конструкции АВД является объединение полупроводникового преобразователя, цепей управления транзисторами и электрической машины.

На основании изложенного ставится задача разработки, исследования и практической реализации АВД, соответствующего следующим требованиям:

- 1) построение АВД на основе статора серийной асинхронной машины без изменения геометрии и обмоточных данных;
- 2) разработка такой схемы соединения обмоток управления АВД, применение которой приведет к тому, что магнитная система

статора будет входить в режим насыщения лишь кратковременно, исключая глубокое насыщение.

Проведенный анализ принципа действия АД показывает, что при исследовании подобных систем необходимо рассматривать электромеханическую, магнитную и коммутационную системы в совокупности. В связи с этим для учета состояния силовых транзисторов предлагается использовать метод обобщенных функций, который применительно к задачам электротехники и электромеханики получил название метода переключающих (коммутационных) функций. Уравнения коммутационной системы АД предполагается записать с помощью известных в теории графов матрично-топологических соотношений. Для учета нелинейности магнитопровода предлагается использовать методы сплайн аппроксимации.

ВО ВТОРОЙ ГЛАВЕ «Математическая модель асинхронного вентильного двигателя» представлено математическое описание трехфазного идеального источника, неуправляемого выпрямителя, LC – фильтра, автономного инвертора напряжения и электрической машины с учетом нелинейности магнитопровода.

Для создания математической модели приведен анализ принцип действия АД, схема которого приведена на рис. 1.

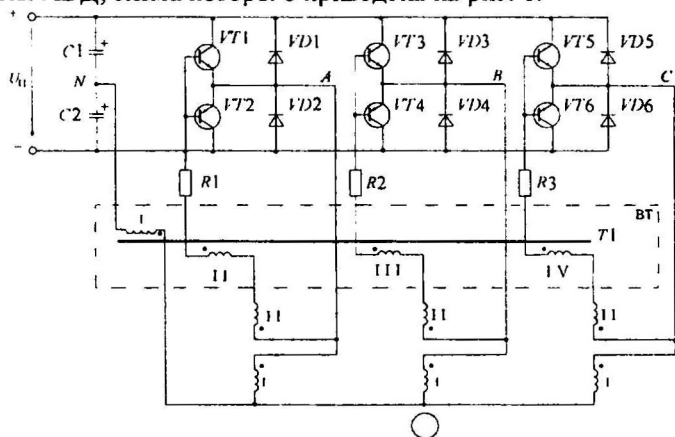


Рис. 1 – Принципиальная электрическая схема АД

Обмотки фаз статора I соединены в звезду, их начала подключены к выходам A, B, C инвертора. К первичной обмотке вольтодобавочного трансформатора Т1 приложена третья гармоника напряжения. В цепи этой обмотки протекает третья гармоника тока. Обмотки II, включены последовательно с вторичными обмотками II-IV вольтодобавочного трансформатора (ВТ), позволяют формировать управляющие напряжения транзисторов VT1-VT6 прямоугольной формы за счет введения третьей гармоники напряжения в цепи управления транзисторов. Таким образом, реализуется 180

градусный закон коммутации. В результате фазные напряжения будут иметь двухступенчатую форму с амплитудой первой ступени $\frac{1}{3} U_{\Pi}$ и второй ступени $-\frac{2}{3} U_{\Pi}$.

Математическая модель статического преобразователя формируется на основании эквивалентной схемы трехфазного обобщенного преобразователя электрической энергии (рис. 2) для которой на рис. 3 построен структурный граф.

Матрица инцидентности структурного графа трехфазного обобщенного преобразователя электрической энергии может быть представлена в виде двух подматриц $[A] = [A_1 A_2]$. Подматрица $[A_1]$ содержит коэффициенты инцидентности ветвей дерева, а подматрица $[A_2]$ — коэффициенты инцидентности хорд структурного графа.

	O	d	q	a	b	c		1	2	3	4	5	6
O	1			-1	-1	-1	O						
D		-1					D	h_1		h_3		h_5	
Q			1				Q		$-h_2$		$-h_4$		$-h_6$
A				1			A	$-h_1$	h_2				
B					1		B			$-h_3$	h_4		
C						1	C					$-h_5$	h_6

На основании известных в теории графов матрично-топологических соотношений записаны матрицы сечений и главных контуров. С использованием этих матриц записаны уравнения обобщенного преобразователя электрической энергии по первому и второму закону Кирхгофа $[A][I] = 0$, $[B][U] = 0$, а также по методу контурных токов.

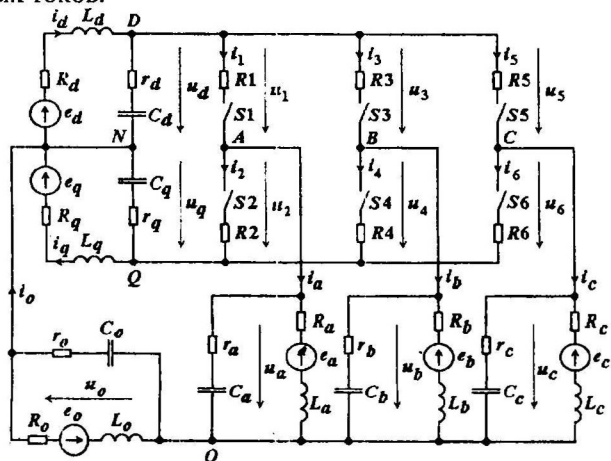


Рис. 2 — Эквивалентная схема трехфазного обобщенного преобразователя электрической энергии

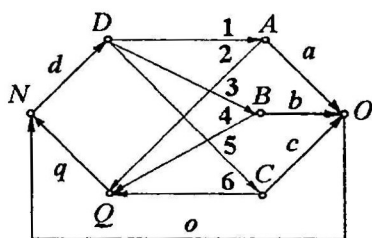


Рис. 3 – Структурный граф

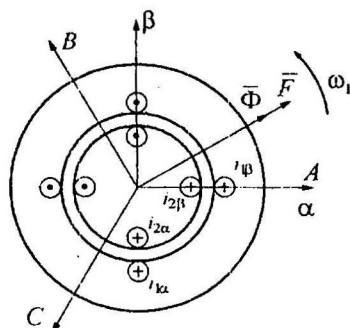


Рис. 4 – Пространственная модель обобщенной машины

Анализ указанных уравнений позволяет записать выражения напряжений преобразователя через переключающие функции следующим образом:

$$u_0 = \frac{(-h_1 - h_3 - h_5)u_a + (h_2 + h_4 + h_6)u_q}{3};$$

$$u_a = \frac{(2h_1 - h_3 - h_5)u_d + (-2h_2 + h_4 + h_6)u_q}{3};$$

$$u_b = \frac{(-h_1 + 2h_3 - h_5)u_a + (h_2 - 2h_4 + h_6)u_q}{3};$$

$$u_c = \frac{(-h_1 - h_3 + 2h_5)u_a + (h_2 + h_4 - 2h_6)u_q}{3}.$$

Для записи трехфазного асинхронного двигателя с учетом нелинейности магнитопровода используется математический аппарат теории обобщенной машины. При этом преобразование координат к осям α , β , 0 обобщенной машины выполняем исходя из следующих принципов:

- 1) эффективное число витков фазы обмотки обобщенной машины равно эффективному числу витков фазы обмотки реальной машины;
- 2) результирующая МДС, создаваемая двухфазной обмоткой обобщенной машины должна быть равна результирующей МДС, создаваемой трехфазной обмоткой реальной машины;
- 3) ток нулевой последовательности обобщенной машины определяется как ток в нейтральном проводе реальной машины.

Подобный подход позволяет сохранить величину магнитного потока, приходящегося на один полюс. В процессе преобразования координат получены соотношения между величинами и параметрами трехфазного асинхронного двигателя и обобщенной электрической машины.

Пространственная модель обобщенной машины в осях α , β показана на рис. 4.

Для учета нелинейности магнитопровода будем считать, что амплитуда результирующей МДС связана с основным магнитным потоком нелинейной зависимостью – кривой намагничивания. Зависимость $\Phi = f(F)$ задается выражением вида:

$$\Phi = bF - c\sqrt{(F - F^0)^2 + a^2} + c\sqrt{(F^0)^2 + a^2},$$

где a , b , c , F^0 – эмпирические константы.

Таким образом, система обобщенной машины будет иметь вид:

$$\left\{ \begin{aligned} u_{1\alpha} &= R_1 i_{1\alpha} + w_3 \frac{d\Phi_\alpha}{dt} + L_{1\sigma} \frac{di_{1\alpha}}{dt}; \\ u_{1\beta} &= R_1 i_{1\beta} + w_3 \frac{d\Phi_\beta}{dt} + L_{1\sigma} \frac{di_{1\beta}}{dt}; \\ 0 &= R_2 i_{2\alpha} + w_3 \frac{d\Phi_\alpha}{dt} + L_{2\sigma} \frac{di_{2\alpha}}{dt} + \omega(w_3 \Phi_\beta + L_{2\sigma} i_{2\beta}); \\ 0 &= R_2 i_{2\beta} + w_3 \frac{d\Phi_\beta}{dt} + L_{2\sigma} \frac{di_{2\beta}}{dt} - \omega(w_3 \Phi_\alpha + L_{2\sigma} i_{2\alpha}); \\ J_\Sigma \frac{d\omega}{dt} &= p_\Pi (M_3 - M_c); \\ M_3 &= p_\Pi w_3 (\Phi_\alpha i_{1\beta} - \Phi_\beta i_{1\alpha}), \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где $u_{1\alpha}$ и $u_{1\beta}$ – напряжение фаз обмотки статора обобщенной машины; $i_{1\alpha}$, $i_{1\beta}$, $i_{2\alpha}$, $i_{2\beta}$ – ток фаз обмотки статора и ротора обобщенной машины; R_1 , R_2 , $L_{1\sigma}$, $L_{2\sigma}$ – активные сопротивления и индуктивности от потока рассеяния фаз обмоток статора и ротора обобщенной машины; M_3 , M_c – электромагнитный и статический момент обобщенной машины; w_3 – эффективное число витков фазы обмотки обобщенной машины.

Соотношения между параметрами трехфазного асинхронного двигателя и обобщенной машины, полученные в ходе преобразования координат, приводятся в таблице 1.

Благодаря синусоидальному распределению скалярного магнитного потенциала и магнитной индукции вдоль воздушного зазора амплитуда результирующей МДС, скалярного магнитного потенциала и величина основного магнитного потока определяются равенствами:

$$F = \sqrt{F_\alpha^2 + F_\beta^2}; \quad \varphi = \sqrt{\varphi_\alpha^2 + \varphi_\beta^2}; \quad \Phi = \sqrt{\Phi_\alpha^2 + \Phi_\beta^2}.$$

Схема замещения магнитной цепи обобщенной электрической машины показана на рис. 5. В соответствии со схемой замещения

построена пространственная векторная диаграмма МДС и магнитных потоков на рис. 6.

Таблица 1 Соотношения параметров реальной асинхронной машины и параметрами обобщенной машины

Наименование параметров обобщенной машины	Обозначение	Соотношение с параметрами трехфазной машины
<i>Параметры обмотки статора</i>		
Активное сопротивление фазы	$R_1 = R_{1\alpha} = R_{1\beta}$	$R_1 = \frac{2}{3} R_s$
Индуктивность фазы от потока рассеяния	$L_{1\sigma} = L_{1\alpha\sigma} = L_{1\beta\sigma}$	$L_{1\sigma} = \frac{2}{3} L_{\sigma s}$
Индуктивность фазы	$L_1 = L_{1\alpha} = L_{1\beta}$	$L_1 = \frac{2}{3} L_{\sigma s} + M_m$
Активное сопротивление фазы нулевой последовательности	R_{1o}	$R_{1o} = \frac{1}{3} R_s$
Индуктивность фазы нулевой последовательности	L_{1o}	$L_{1o} = \frac{1}{3} L_{\sigma s}$
<i>Параметры обмотки ротора</i>		
Активное сопротивление фазы	$R_2 = R_{2\alpha} = R_{2\beta}$	$R_2 = \frac{2}{3} R_r$
Индуктивность фазы от потока рассеяния	$L_{2\sigma} = L_{2\alpha\sigma} = L_{2\beta\sigma}$	$L_{2\sigma} = \frac{2}{3} L_{\sigma r}$
Индуктивность фазы	$L_2 = L_{2\alpha} = L_{2\beta}$	$L_2 = \frac{2}{3} L_{\sigma r} + M_m$
Активное сопротивление фазы нулевой последовательности	R_{2o}	$R_{2o} = \frac{1}{3} R_r$
Индуктивность фазы нулевой последовательности	L_{2o}	$L_{2o} = \frac{1}{3} L_{\sigma r}$

По осям α , β (на один воздушный зазор) действуют МДС, первые гармоники которых имеют следующие амплитудные значения

$$F_{\alpha} = \frac{1}{2} w_{\sin} (i_{1\alpha} + i_{2\alpha}); \quad F_{\beta} = \frac{1}{2} w_{\sin} (i_{1\beta} + i_{2\beta}),$$

где w_{\sin} – число витков фазы синусной обмотки статора или ротора обобщенной электрической машины.

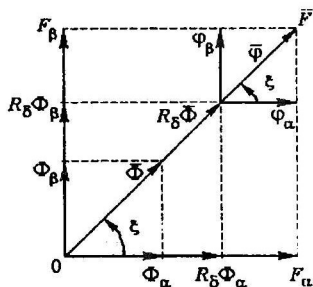
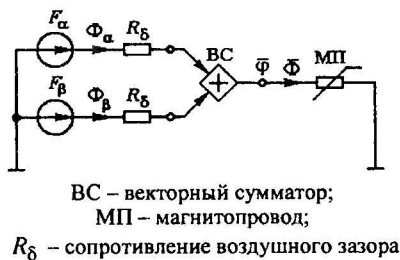


Рис. 5 – Схема замещения магнитной цепи обобщенной машины

На основании анализа пространственной векторной диаграммы записаны уравнения компонент магнитного потока:

$$\begin{aligned} \frac{d\Phi_\alpha}{dt} = & (\Lambda_c \sin^2 \xi + \Lambda_n \cos^2 \xi) \frac{w_{\sin}}{2} \left(\frac{di_{1\alpha}}{dt} + \frac{di_{2\alpha}}{dt} \right) + \\ & + \frac{\sin 2\xi}{2} (\Lambda_n - \Lambda_c) \frac{w_{\sin}}{2} \left(\frac{di_{1\beta}}{dt} + \frac{di_{2\beta}}{dt} \right); \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\Phi_\beta}{dt} = & \frac{\sin 2\xi}{2} (\Lambda_d - \Lambda_c) \frac{w \sin}{2} \left(\frac{di_{1\alpha}}{dt} + \frac{di_{2\alpha}}{dt} \right) + \\ & + (\Lambda_c \sin^2 \xi + \Lambda_d \cos^2 \xi) \frac{w \sin}{2} \left(\frac{di_{1\beta}}{dt} + \frac{di_{2\beta}}{dt} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

В уравнениях (2), (3) через Λ_c и Λ_d обозначены статическая и дифференциальная магнитные проводимости, приходящиеся на один воздушный зазор: $\Lambda_c = \frac{\Phi}{F}$; $\Lambda_d = \frac{d\Phi}{dF}$.

Выразим производные от токов из уравнений системы (1), получим

$$\frac{di_{l\alpha}}{dt} = \frac{1}{L_{l\alpha}} \left(u_{l\alpha} - R_{l\alpha} i_{l\alpha} - w_{\alpha} \frac{d\Phi_{\alpha}}{dt} \right); \quad (4)$$

$$\frac{di_{l\beta}}{dt} = \frac{1}{L_{l\sigma}} \left(u_{l\beta} - R_{l\beta} i_{l\beta} - w_3 \frac{d\Phi_\beta}{dt} \right); \quad (5)$$

$$\frac{di_{2\alpha}}{dt} = \frac{1}{L_{2\sigma}} \left(-R_2 i_{2\alpha} - \omega (w_3 \Phi_\beta + L_{2\sigma} i_{2\beta}) - w_3 \frac{d\Phi_\alpha}{dt} \right); \quad (6)$$

$$\frac{di_{2\beta}}{dt} = \frac{1}{L_{2\sigma}} \left(-R_{2i_{2\beta}} + \omega(w_3 \Phi_\alpha + L_{2\sigma} i_{2\alpha}) - w_3 \frac{d\Phi_\beta}{dt} \right). \quad (7)$$

Совместное решение уравнений (2), (3), (4)–(7) позволяет определить производные магнитных потоков и токов фаз обобщенной машины. С использованием преобразования координат переходим к токам и напряжениям трехфазного АД.

ТРЕТЬЯ ГЛАВА «Проектирование, моделирование и исследование асинхронного вентильного двигателя» посвящена проектированию и компьютерному моделированию АД, схема которого представлена на рис. 1.

На основании стандартной методики проектирования асинхронного двигателя разработана методика расчета АД, особенности которой заключается в том, что коэффициент заполнения паза определяется с учетом обмоток управления, производится расчет частоты коммутации, а также расчет вольтодобавочного трансформатора.

Разработанная методика проектирования позволила установить, что применение схемы АД, представленной на рис. 6, обеспечивает экономию меди на 18,2% по сравнению со схемой АД, предложенной в патенте РФ на изобретение № 2147154.

Компьютерное моделирование электромагнитных и электромеханических процессов в АД производилось по мгновенным значениям токов и напряжений. Результаты компьютерного моделирования показаны на рис. 7 – рис. 11.

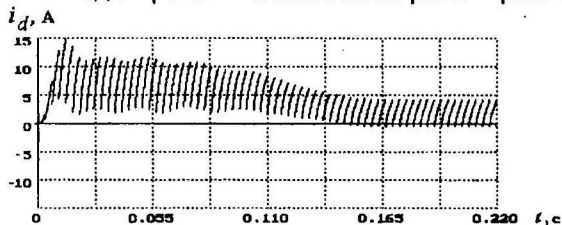


Рис. 7 – Кривая тока, потребляемого инвертором от выпрямителя при пуске АД с номинальной нагрузкой

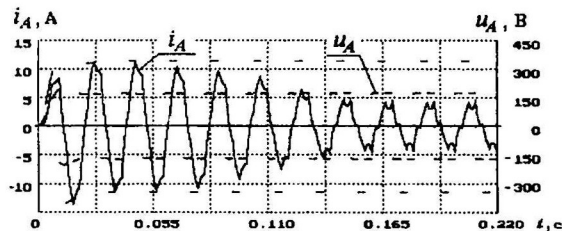


Рис. 8 – Кривые фазного напряжения и тока статора АД при пуске с номинальной нагрузкой

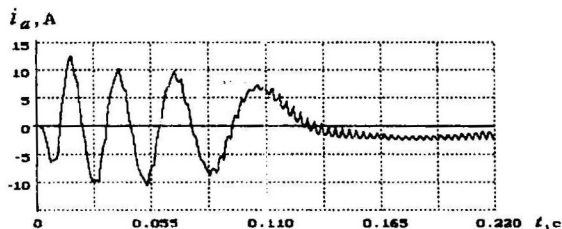


Рис. 9 – Кривая фазного тока ротора АД при пуске с номинальной нагрузкой

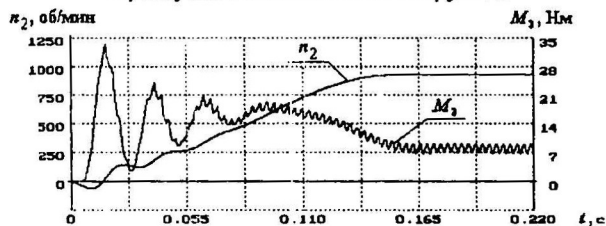


Рис. 10 – Кривые электромагнитного момента и скорости ротора при пуске АД с номинальной нагрузкой

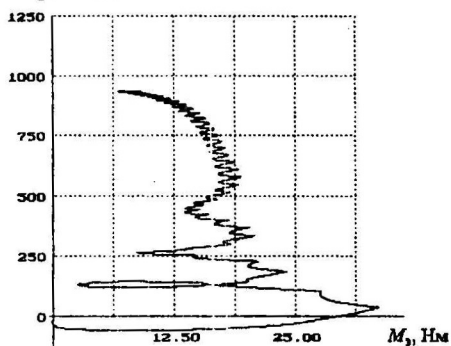
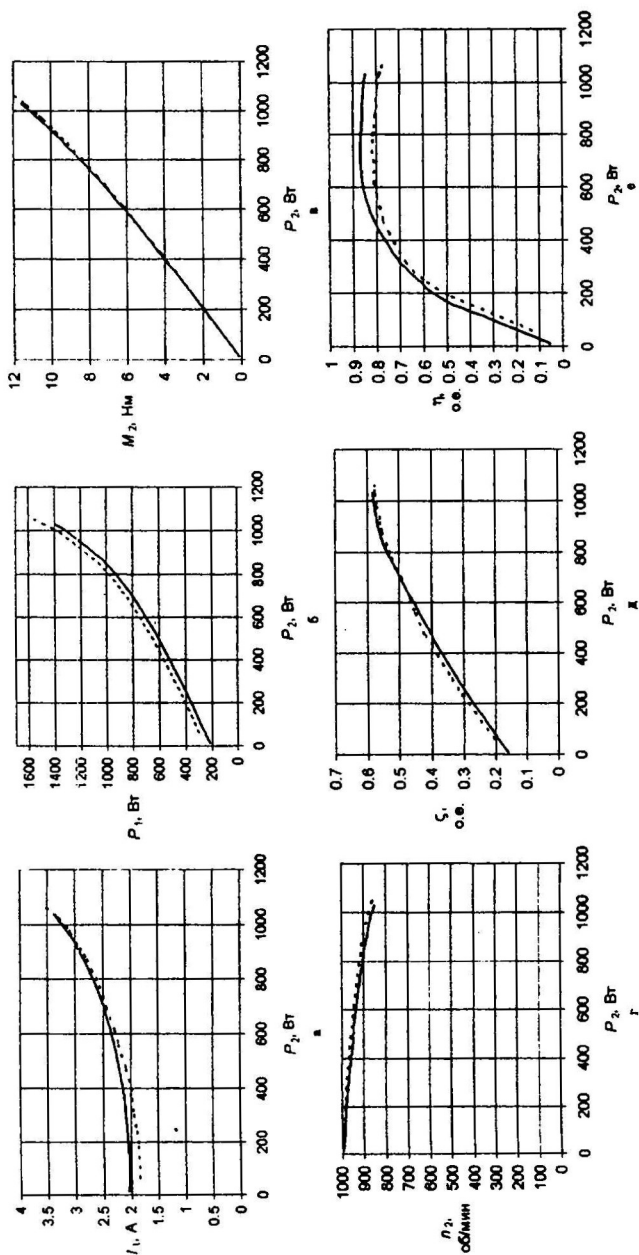


Рис. 11 – Динамическая механическая характеристика АД при пуске с номинальной нагрузкой

С помощью компьютерного моделирования был произведен расчет рабочих характеристик, которые представлены на рис. 12. Буквой ς обозначен коэффициент мощности АД. На этом же рисунке представлены рабочие характеристики, расчет которых производился на основании разработанной методики проектирования. Следует отметить, что инженерная методика расчета позволяет анализировать статические режимы работы АД с учетом нелинейности магнитопровода. Разработанная компьютерная модель позволяет анализировать как динамические, так и статические режимы. Сопоставив представленные на рис. 12 результаты видим, что они достаточно близки.



— — рабочие характеристики, полученные с помощью моделирования
 --- — расчетные рабочие характеристики
 Рнс. 12 — Рабочие характеристики АВД

Таким образом, можно сделать вывод о приемлемой точности разработанной математической модели, её адекватности, корректности введенных допущений и возможности дальнейшего применения в научных исследованиях.

В ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ «Экспериментальное исследование асинхронного вентильного двигателя» приводятся результаты экспериментального исследования и анализа технического уровня АД, а также сведения о внедрении.

Объектом исследования является АД мощностью 750 Вт выполненный по схеме на рис. 1. Трехфазный АД выполнен на конструктивной основе двигателя АИР80А6У3.

Измерение и регистрация мгновенных значений токов, напряжений и частоты вращения ротора осуществлялось с использованием пакета *PowerGraph 3.3 Professional*. Измерение момента на валу АД проводилось методом электромагнитного тормоза.

Осциллограммы фазного напряжения и тока приведены на рис. 13 и рис. 14. На осциллограммах, представленных на рис. 13 и рис. 14, приняты следующие масштабы: 200 В/см, 1,2 А/см и 5 мс/см. Осциллограмма напряжения и тока первичной обмотки вольтодобавочного трансформатора приводятся на рис. 15 и рис. 16, соответственно. Для этих осциллограмм приняты следующие масштабы: 50 В/см, 0,5 А/см и 5 мс/см.

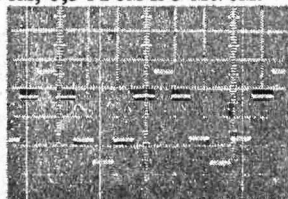


Рис. 13 – Осциллограмма фазного напряжения статора АД

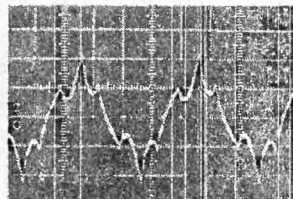


Рис. 14 – Осциллограмма фазного тока статора АД

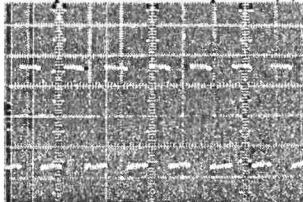


Рис. 15 – Осциллограмма напряжения первичной обмотки ВТ

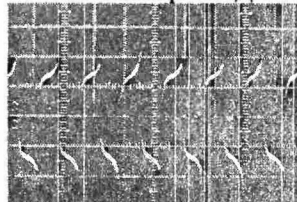


Рис. 16 – Осциллограмма тока первичной обмотки ВТ

Расхождение результатов численного расчета и экспериментального исследования по мгновенным значениям токов составляет 4-6 %, а напряжений – 5-7 %.

Экспериментально установлено, что диапазон регулирования частоты вращения по закону $U_i f = const$ макетного образца АД составил 1:3,8. Экспериментальные рабочие характеристики макетного образца АД приведены на рис. 17.

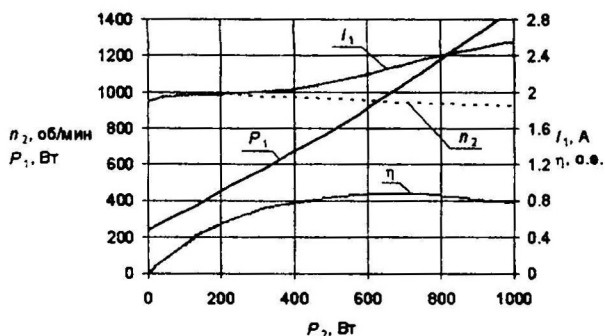


Рис. 17 – Рабочие характеристики макетного образца АД

Относительная погрешность по коэффициенту полезного действия составляет 4-6 %, по фазному току – 7-9 %, а по моменту и скорости вращения – 6-11 %.

Таким образом, сравнительный анализ результатов компьютерного моделирования и экспериментального исследования АД показал высокую точность математической модели и корректность принятых допущений. Это позволяет сделать вывод о возможности практического применения разработанных методик проектирования и исследования АД.

Представленные кривые подтверждают, что математическая модель АД обладает высокой точностью.

Сравнительный анализ экспериментального и численного исследования рабочих характеристик АД показал, что разработанная методика расчета интегральных характеристик обладает высокой точностью и может успешно применяться при анализе подобных систем.

В ходе экспериментальных исследований, значительное внимание уделялось исследованию влияния параметров ВТ на характер электромагнитных процессов. Установлено, что синхронизация определяется третьей гармоникой тока, протекающего по первичной обмотке ВТ.

Проведенный анализ технического уровня разработанного АД мощностью 750 Вт показывает, что он не уступает уровню серийных образцов асинхронных двигателей и двигателей постоянного тока, что подтверждает его конкурентоспособность.

В ЗАКЛЮЧЕНИИ обобщены основные результаты работы.

В ПРИЛОЖЕНИИ приведены сведения о внедрении результатов работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Подводя итоги теоретических и экспериментальных исследований проведенных в данной работе, можно сделать следующие выводы:

1) Разработана электрическая принципиальная схема АД защищенная патентом РФ на изобретение № 2326491.

2) Уравнения автономного инвертора записываются с помощью известных в теории графов матрично-топологических соотношений. При

этом коммутационные функции, учитывающие состояние силовых ключей, введены непосредственно в топологические матрицы. Это позволяет формализовать процесс записи уравнений автономного инвертора.

3) С использованием топологических матриц записано матричное уравнение преобразователя по методу контурных токов. Показано, что данное уравнение является универсальным и пригодно для описания электромагнитных процессов как в инверторе напряжения так и в инверторе тока при любом законе управления вентиляльными элементами.

4) С использованием математического аппарата теории обобщенной электрической машины в осях α , β разработан подход к описанию электромеханического преобразователя энергии, позволяющий учесть нелинейность магнитопровода. Уравнения обобщенной электрической машины записываются при условиях равенства результирующих МДС, создаваемых двухфазной обмоткой обобщенной машины, и трехфазной обмоткой асинхронного двигателя, а также величины магнитного потока, приходящегося на один полюс.

5) Проведено компьютерное моделирование электромагнитных и электромеханических процессов в АВД с учетом нелинейности магнитопровода в системе *Turbo Pascal 7.0*, получены кривые переходных и установившихся процессов, а также рабочие характеристики.

6) Разработана методика проектирования АВД, с использованием которой произведен конструктивный расчет. Результаты расчета показали, что предлагаемая схема АВД обеспечивает экономию меди на 18,2 %.

7) Разработанная методика проектирования позволяет анализировать статические режимы работы АВД с учетом нелинейности магнитопровода, а разработанная компьютерная модель – как динамические, так и статические режимы. Сравнительный анализ рабочих характеристик, полученных в результате расчета по разработанной методике проектирования, а также с помощью компьютерной модели показал, что они достаточно близки.

8) Сравнительный анализ результатов компьютерного моделирования и экспериментального исследования макетного образца АВД мощностью 750 Вт показывает, что отклонения по мгновенным значениям токов составляют 4-6 %, по мгновенным значениям напряжений – 5-7 %. Анализ рабочих характеристик показал, что относительная погрешность по коэффициенту полезного действия составляет 4-6 %, по фазному току – 7-9 %, а по моменту и скорости вращения – 6-11 %. Таким образом, сравнительный анализ показал высокую точность математической модели и корректность принятых допущений.

РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Пат. 2326491 Российская Федерация, МПК H02P 27/06, H02M 5/275, H02M 7/53. Вентильная машина переменного тока [Текст] / Хайруллин И.Р., Макаров В.Г., Кропачев Г.Ф.: заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Казанский государственный технологический университет». - № 2007104878/09; заявл. 31.01.2007; опубл. 10.06.2008, Бюл. № 16. – 8 с.: ил.

2. Хайруллин И.Р., Макаров В.Г., Кропачев Г.Ф. Математическая модель электромеханотронной системы с автогенераторным управлением на базе трехфазного синхронного двигателя [Текст] // **Известия высших учебных заведений Проблемы энергетики**. Казань, КГЭУ, 2007, № 3-4. – С. 83-93.
3. Хайруллин И.Р., Макаров В.Г., Кропачев Г.Ф. Электромеханотронная система с высокоскоростным асинхронным двигателем [Текст] // **Известия высших учебных заведений Проблемы энергетики**. Казань, КГЭУ, 2007, № 5-6. – С. 78-87.
4. Хайруллин И.Р., Макаров В.Г., Кропачев Г.Ф., Атюхин С.С. Анализ состояния и перспективы развития электромеханотронных систем с автогенераторным управлением [Текст] // **Известия высших учебных заведений Проблемы энергетики**. Казань, КГЭУ, 2007, № 7-8. – С. 87-99.
5. Хайруллин И.Р., Макаров В.Г., Кропачев Г.Ф., Толмачева А.В. Электромашинно-вентильная система на базе вентильной машины переменного тока [Текст] // **Известия высших учебных заведений Проблемы энергетики**. Казань, КГЭУ, 2009, № 1-2. – С. 77-85.
6. Хайруллин И.Р., Макаров В.Г., Кропачев Г.Ф. Математическая модель трехфазного обобщенного преобразователя электрической энергии, как компонента электрической цепи [Текст] // **Известия высших учебных заведений Проблемы энергетики**. Казань, КГЭУ, 2009, № 3-4. – С. 111-124.
7. Хайруллин И.Р., Макаров В.Г., Кропачев Г.Ф. Моделирование электромагнитных процессов в электромеханических системах с помощью теории графов [Текст] // Информационные технологии и математическое моделирование (ИТММ-2006): Материалы V Международной научно-практической конференции. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2006. Ч. 2. – С. 32-34.
8. Хайруллин И.Р., Макаров В.Г., Кропачев Г.Ф. Трехфазная асинхронная вентильная машина [Текст] // Электромеханические преобразователи энергии: Материалы междунар. науч.-техн. конф. Томск, ТПУ, 2007. С. 30-33.
9. Хайруллин И.Р., Макаров В.Г., Цвенгер И.Г., Шаряпов А.М. Электромашинновентильная система с высокоскоростным асинхронным двигателем [Текст] // Электромеханические преобразователи энергии: Материалы междунар. науч.-техн. конф. Томск, ТПУ, 2007. С. 244-247.
10. Хайруллин И.Р., Макаров В.Г. Анализ состояния и перспективы развития электромеханотронных систем с автогенераторным управлением [Текст] // Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий: Сб. материалов XIX Всерос. междунар. науч.-техн. конференции. В 2-х ч. Ч. 1. Казань: Изд-во «Отечество», 2007. – С. 38-40.
11. Хайруллин И.Р., Макаров В.Г., Цвенгер И.Г., Шаряпов А.М. Моделирование разомкнутых систем электропривода переменного тока [Текст] // Сб. материалов V Междунар. (XVI Всероссийской) научн. конф. С.-Петербург, 2007. С. 190-191.
12. Хайруллин И.Р., Макаров В.Г., Атюхин С.С. Электромеханотронные системы с автогенераторным управлением

[Текст] // Мавлютовские чтения: Всерос. молодежная научн. конф.: Сб. трудов. В 5-и т. Т.2. – Уфа: изд-во УГАТУ, 2008. – С. 10-11.

13. Хайруллин И.Р., Макаров В.Г., Кропачев Г.Ф. Вентильная машина переменного тока [Текст] // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: Сб. научн. трудов Всерос. научн.-техн. конф. В 2-х т. Т.1 – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2007. С. 197-204.

14. Хайруллин И.Р., Макаров В.Г., Кропачев Г.Ф. Преобразователь электрической энергии как компонента электрической цепи [Текст] // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: Сб. научн. трудов Всерос. научн.-техн. конф. В 2-х т. Т.1 – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2007. С. 204-211.

15. Хайруллин И.Р., Макаров В.Г., Кропачев Г.Ф. Анализ способов задания кривых намагничивания стале [Текст] // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: Сб. научн. трудов Всерос. научн.-техн. конф. В 2-х т. Т.1 – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2007. С. 211-218.

16. Хайруллин И.Р., Макаров В.Г., Толмачева А.В. Вентильная машина с третьей гармоникой тока [Текст] // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: Сб. научн. трудов II Всерос. научн.-техн. конф. В 2-х т. Т.1 – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2009. – С. 104-110.

17. Хайруллин И.Р. Вентильная машина с третьей гармоникой тока [Текст] // Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий: Сборник материалов XXI Всероссийской межвузовской научно-технической конференции. Ч. 1. Казань: Изд-во «Отечество», 2009. – С. 60-61.

Заказ 423

Тираж 100 экз.

Издательство Казанского государственного технологического университета

Офсетная лаборатория Казанского государственного
технологического университета

420015, г. Казань, ул. К.Маркса, 68